

圧接試験片における接合部電気抵抗の基礎的測定

Electric-Resistance Measurement of Magnetic Pulse Welding Samples

梶沢 栄基¹⁾, 石橋 正基²⁾, 岡川啓悟³⁾

Eiki Kabasawa¹⁾, Masaki Ishibashi²⁾, Keigo Okagawa³⁾

Abstract: A rated current of a lithium ion battery bank for an electric vehicle (EV) is about 50 to 70A, and then an instant current of the battery exceeds 200A. When the current flows from the battery bank to a driving motor, the cells composing the battery have a chemical reaction heat. And then, the heat is conducted to the current-collection-tabs connected with the battery. It is considered that the sheet metal is connected with the tab as one of the solutions in order to maintain the ability of the power supply. Magnetic pulse welding is effective for lap-joining similar and dissimilar sheet metals such as Al/Al, Cu/Cu and Cu/Al. In this study, a voltage drop of the juncture of the sheets obtained by this welding method was measured 1000 times automatically by both a crossed rod method and a four-wire terminal method, and an electric joining resistance of the juncture was estimated by an average value of the voltage drop. The joining resistances, Al/Al and Cu/Cu, were less than 5 $\mu\Omega$ both. Therefore, the joule exothermic reaction of the juncture by the passage of the large current is small, and the absorption of the heat which arises in the battery can be expected.

Keyword: Joining resistance, Magnetic pulse welding, Crossed rod method, Four-wire connection method

1. はじめに

実用化された電気自動車はエネルギー源の大容量直流電源、直流を交流に変換するインバータおよび駆動する三相同期電動機で構成される。三相同期電動機の定格電圧は330~360V、定格電流は50~70Aであり、始動時にはこの数倍の電流が流れる。大容量直流電源には、リチウムイオン二次電池が用いられる。リチウムイオン二次電池単体の電圧は約3.7V、取り出せる電流は電極面積に依存する。したがって、大容量直流電源は、二次電池単体を直列もしくは並列に多数接続して製作したモジュールの集電タブ（端子）を、板厚の大きい金属集電板を介して直列および並列に多数接続（接合）して構成される。二次電池単体の正極基材はアルミニウムであり、負極基材は銅であるため、アルミニウム同士および銅同士の同種集電タブ、およびアルミニウムと銅の異種集電タブの接続が行われる。大容量直流電源は三相同期電動機の駆動時に電流を供給し、回生時に電流を受け取る。この過程で、モジュール、集電タブおよびそれらの接続部は化学反応熱やジュール熱によって温度上昇する。この温度上昇はリチウムイオン二次電池の出力性能を低下させるため、抑制しなければならない。抑制法として、集電タブに板厚の大きい金属集電板を接合して伝導吸熱する方法が考えられる。このとき、接合部に要求される事項は、接合抵抗が集電タブや集電板と同等である、および真実接合面積が大きいことである。また、路面からの振動によって生じるはく離力を受けるため、接合

部は大きな接合強さを持ち、耐久性に優れていなければならない。

電磁圧接法は衝突面の清浄化工程と密着工程を併せ持つ固相接合法であり、重ねた同種および異種金属薄板を2本の線状にシーム接合できる。本論文では、電磁圧接法で採取したアルミニウム同士および銅同士の同種圧接板について、試験片の採取、クロスワイヤー法および4端子測定法で調べた接合抵抗について述べる。

2. 圧接実験装置と試験片の採取

2.1. 圧接実験装置

圧接実験装置の概要をFig.1に示す。Fig.1(a)はE字形平板状ワンターンコイルの平面図、Fig.1(b)は放電回路、コイルおよび金属薄板の断面図を示している。Fig.1(a)のE字形コイルは、二つの隙間 d によって細長い中央直線部と広い両側部に分けられている。圧接は中央直線部の上面で行われる。コイル幅 b は5mm、板厚 c は3mm、コイル中央の直線部長さ a は80mmである。Fig.1(b)で、2枚の金属薄板はスペーサーで1.0mmの間隙を設けられてコイル上面に置かれ、コイルや固定具と一緒に締付け金具で固定される。コンデンサ電源 C —放電ギャップスイッチ G —コイル L は放電回路であり、電源容量 C は100 μF である。矢印で示されるように、放電電流は両側部(●)から細長い中央直線部(⊗)に集中して流れる。中央直線部の電流密度は高くなり、Fig.1(a)の長手方向（シーム長さ方向）周辺に高密度磁束を生成する。この高密度磁束はコイ

1)東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科、電子情報工学コース 2)同 電気電子工学コース 3)同 名誉教授

ル上面の可動薄板に交差する。磁束の浸透を妨げるように、コイル上面の可動薄板部分にパルス大電流と逆方向の渦電流 (●) が流れる。その結果、この薄板部分は、電磁力によって間隙を狭くする方向に高速度で円弧状に変形し、固定薄板に衝突して圧接される。

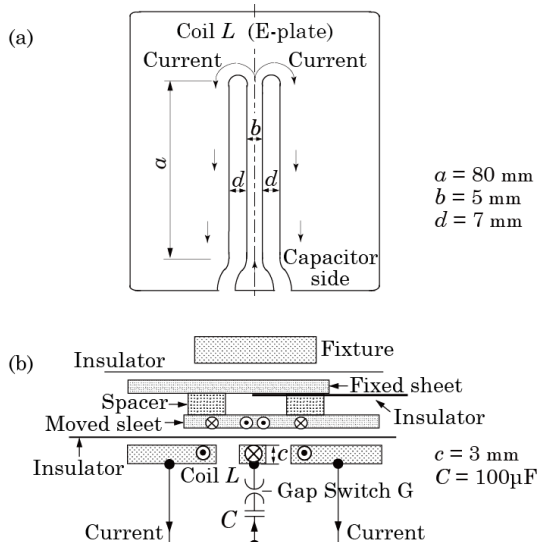


Fig.1 General outlines of apparatus: (a) plan view of one-turn coil without sheet metal and fixture, (b) section view with discharge circuit.

2. 2. 試験片の採取

使用した金属薄板は A1050-H24 純アルミニウム薄板 (Al と略記) および C1100-1/4H 純銅板 (Cu と略記) である。板厚は 1.0mm および 0.6mm である。Al の%導電率は 58%, 引張強さは 122MPa である。Cu の%導電率は 101%, 引張強さは 246MPa である。

原理上、二枚の金属薄板は Fig.1(a)の長手方向に沿って 2 本の線状に固相接合される [1],[2]。接合部の抵抗が非常に小さいと予想されるため、Fig.1(b)に示すように、コイル中心に位置する固定薄板のコイル側半分に 50 μm 厚のポリイミドフィルムを挿入し、1 本の線状に接合した。放電エネルギーは 2.0kJ、圧接板は純アルミニウム薄板同士 (Al/Al と略記) と純銅薄板同士 (Cu/Cu と略記) である。

試験片は、Fig.2 に示すように、圧接板の中央部分をシーム方向と垂直 (点線で示す) に、ファインカッターを用いて約 5mm 幅で切断し、それぞれ 3 本の試験片を採取した。試験片の断面を Fig.3(a)に示す。コイルの中央直線部の上方に位置する可動薄板部分が変形している。試験片の圧接部分の拡大図 Fig.3(b)から、接合部幅は約 1mm で 1 か所接合されていることが分かる。Fig.2 で、試験片を採取した残りの圧接板から、約 5mm 幅で試験片を採取し、引張せん断試験を行った。試験片は接合部はく離ではなく、母材で破断した。引張せん断強さは Al/Al 試験片で 121MPa, Cu/Cu 試験片で 231MPa である。1 本の線状接合であるが、接合強さが大きいことを確認した。

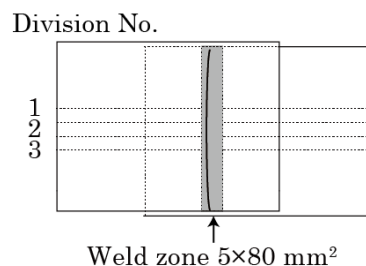


Fig.2 Collection of test piece (Division of welded sheets)

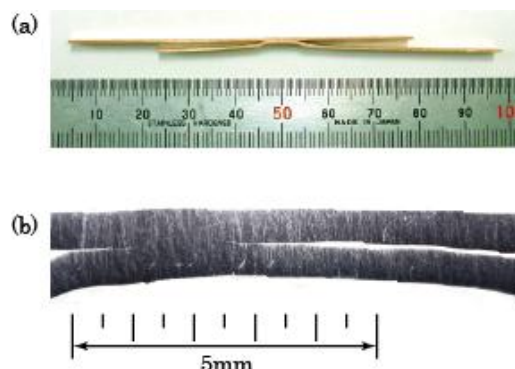


Fig.3 Section view of test piece: (a) whole picture, (b) joining area

3. 電圧降下法による抵抗測定と試験片の寸法

電圧降下法による測定は Fig.4 に示すクロスワイヤー法および Fig.5 に示す 4 端子法で行った。使用した測定器は TFF Corporation Keithley Instruments 社製の Model 6221 AC and DC Current Source と Model 2182A Digital Nanovoltmeter である。6221 の公称ノイズ(p-p)は 100mA で 10 μA , 2182A の感度は 10nV である。

3. 1. クロスワイヤー法 [3]

Fig.4 にクロスワイヤー法による測定回路を示す。図中央部にある楕円部分が接合部を示し、試験片 4 隅の黒く塗りつぶされた四角は測定用端子である。定電流が試験片中に描いた矢印方向に流れたとき、電圧計は電流の流れる接合部のみの電圧降下を測定する。したがって、試験片の接合抵抗が大きければ電圧降下が大きくなるため、信頼できる接合抵抗が得られる。試験片に流れる電流値は定電流源で 100mA と設定し、繰り返し 1000 回の電圧測定を自動的に行った。また、熱起電力を含むオフセットノイズの影響を無視するため、極性を反転させながら測定を行うデルタ法 [4] を適用した。

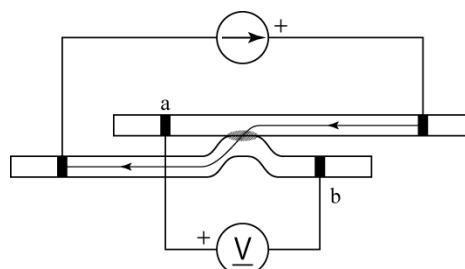


Fig.4 Crossed rod method

3.2.4 端子法[5]

Fig.5 に 4 端子法の測定回路を示す。電圧計の内部抵抗は非常に大きいため、電圧計に直列接続されたリード線の抵抗およびリード線と試験片の接合抵抗を無視することができる。したがって、電圧計には電流が流れないと考えられることから、採取した Al/Al と Cu/Cu の試験片には、圧着もしくははんだ付けによりリード線端子を接続した。クロスワイヤー法と異なり、電流が流れる経路に電圧計を挿入するため、測定電位はリード線端子間に挟まれる母材の抵抗による電圧降下と接合部の抵抗による電圧降下との和になる。よって、試験片に取り付けるリード線端子の位置および試験片断面積により抵抗値が異なる。リード線端子を接続した Cu/Cu 試験片を Fig.6 に示し、試験片の寸法（リード線端子間距離： L 、厚さ： w 、幅： d ）もあわせて記した。また、比較のために圧接していない Al 板と Cu 板に、Al/Al と Cu/Cu 試験片のリード線端子間距離とほぼ同じ大きさの位置にリード線端子を接続し、4 端子法により測定を行った。なお、全試験片ともに測定条件はクロスワイヤー法と同様である。

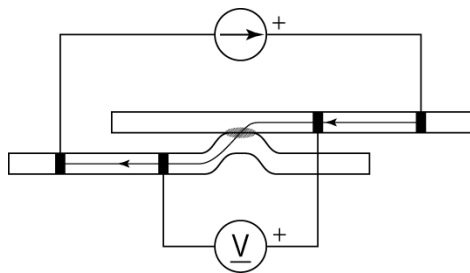


Fig.5 Four-wire connection method

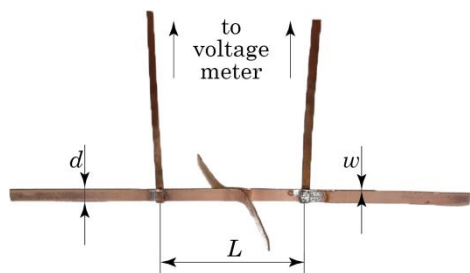


Fig.6 Sizes of the test sample

4. 実験結果と考察

4.1. クロスワイヤー法で得られた接合抵抗

Cu/Cu 試験片の測定電圧を Fig.7 に示す。1000 回の自動測定の平均値は大きさが約 200nV で、極性は負の値を示した。標準偏差 σ は 46nV である。また、Al/Al 試験片の測定電圧の平均値は 420nV ($\sigma = 16\text{nV}$) で、Cu/Cu 試験片と同様に極性は負の値を示した。

試験片内の電位分布を確認するため、Fig.8 に示す回路を用いて電位分布を測定した。測定した結果を Fig.9 に示す。中心部分を十字に横切っている白い帯状の物体が試験

片で、電流は右から左に流れている。測定条件はクロスワイヤー法と同様である。電位はグレースケールで表示しており、黒色が高電位、白色が低電位になっている。○印が測定点を示しており各点は 0.2mm 間隔で測定した。Fig.9 に記した記号 a, b は Fig.4 の電圧端子 a, b と対応している。試験片 a 部分 (Fig.4 電圧計：+端子) の電位は薄いグレーであるのに対し、b 部分 (Fig.4 電圧計：-端子) の電位は黒であり、電位は b の方が高いことがわかる。この結果はクロスワイヤー法の測定結果と一致する。また、電位差は接合部に対し平行に発生しており、大きな接合抵抗が無いように見える。

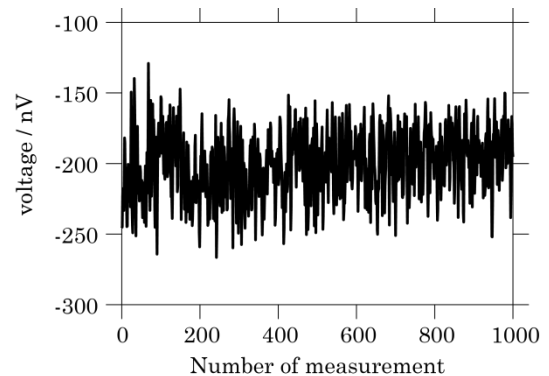


Fig.7 Measured voltage versus number of measurement for Cu/Cu obtained by cross rod method

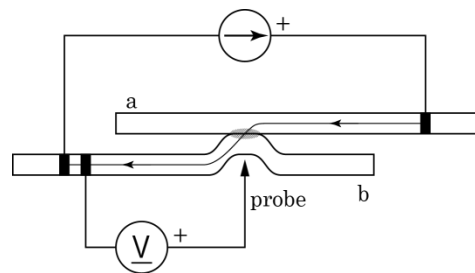


Fig.8 Measurement circuit of electric potential

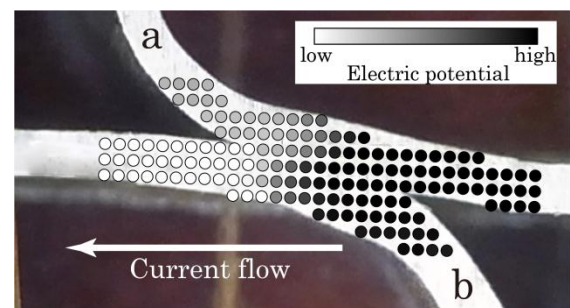


Fig.9 Electric potential for Cu/Cu

Fig.7, Fig.9 で負の値を示した理由を、試験片の接合部周辺を分布抵抗で表した Fig.10 の等価回路で検討する。接合部は金属薄板 1 と 2 の間の部分となり、矢印は電流の流れる向きを示す。 r_j は接合部の単位長さ当たりの分布抵抗、 r は試験片の単位長さ当たりの分布抵抗である。電

圧計の指示電圧 V は、Fig.4 の a 点の電圧を V_a 、b 点の電圧を V_b とすれば式(1)で表される。

$$V = V_a - V_b \quad (1)$$

酸化物や有機物などの不純物があれば、 r_j は大きい値になる。これらが排除された接合であれば、 r_j は金属薄板の抵抗値に近くなる。そこで、接合部の分布抵抗 r_j と試験片の分布抵抗 r の関係が、 $r_j \gg r$ と $r_j \approx r$ の場合の測定電圧について検討する。

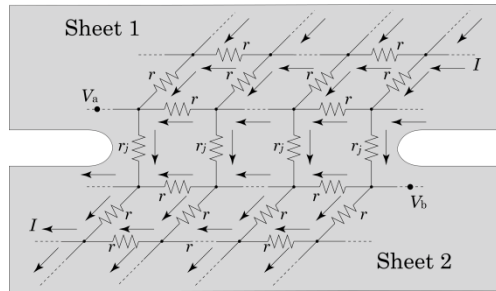


Fig.10 Equivalent circuit of joined section

4. 1. 1. 高い接合抵抗での測定電圧

$r_j \gg r$ の場合、Fig.3 の接合部の長さ方向（リード線端子の方向）の電圧降下に比べて接合部の厚さ方向（ r_j 方向）の電圧降下が大きくなるため、 $V_a > V_b$ になり、 $V > 0$ になる。したがって、電圧計は正の極性を示す。また、測定電圧から接合抵抗を求められる。

4. 1. 2. 低い接合抵抗での測定電圧

$r_j \approx r$ の場合、電圧計の示す指示値と極性は Fig.3 の接合部の長さ方向の距離と実質的な接合抵抗の厚さの大小関係に依存する。Fig.3(b)の試験片の顕微鏡写真から、接合部長さは約 1mm である。また、引張せん断試験で接合部はく離でなく母材破断した事実は、Cu/Cu の接合界面に高抵抗の酸化膜や有機物による不純物層が残っていない部分が存在し、その部分で両方の金属薄板が一体化していることを示唆している。したがって、接合厚さは接合長さに比べて非常に小さく、不純物層が残っていない部分が存在することから接合抵抗も非常に小さい。接合部の厚さ方向の電圧降下に比べ、接合部の長さ方向の電圧降下が大きくなるため、 $V_a < V_b$ 、 $V < 0$ になり、電圧計は負の極性を示したと考えられる。これから、電圧計の平均値の大きさ約 200nV は、接合部の厚さ方向の電圧降下でなく、主に接合部の長さ方向の電圧降下である。したがって、接合抵抗をクロスワイヤー法で求めることはできない。

本実験装置を用いたクロスワイヤー法により、接合抵抗が非常に小さいことは確認できたが、その値を知ることはできなかった。

4. 2. 4 端子法で得られた接合抵抗

4. 2. 1. 試験片の抵抗と抵抗率

クロスワイヤー法を用いて接合抵抗を測定することができなかったため、Table.1 に示す寸法の試験片を用いて 4 端子法測定を行った。Fig.11 に Al/Al 試験片の電圧降下

から求めた抵抗値、Fig.12 に Cu/Cu 試験片の電圧降下から求めた抵抗値を示す。同様に、比較のため Al 板と Cu 板の抵抗値を求めた。これらの抵抗値の平均値 R と標準偏差 σ を Table.2 に示す。 σ は全ての試験片で R の 1/500 倍程度であるため、ばらつきは少ない。また、試験片の抵抗 R は式(2)で表される。

$$R = \rho \frac{L}{wd} \quad (2)$$

ρ は抵抗率、 L は長さ、 w は厚さおよび d は幅である。

式(2)を用いて Table.1 と Table.2 から求めた抵抗率 ρ を Table.3 に示す。圧接していない Al 板および Cu 板の抵抗率と Al/Al 試験片、Cu/Cu 試験片で抵抗率がほとんど変わらない。

Table.1 Sample sizes

sample name		L / mm	w / mm	d / mm
Al/Al	1	49.75	1.00	4.75
	2	47.10	1.00	5.23
	3	48.40	1.00	5.23
Al		51.58	1.00	5.00
Cu/Cu	1	40.23	0.60	4.47
	2	47.50	0.60	5.00
	3	46.08	0.60	4.88
Cu		47.38	0.60	5.00

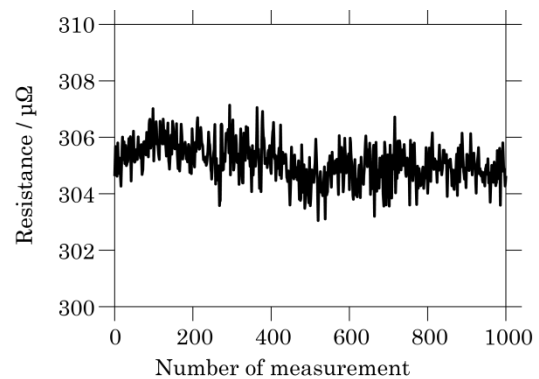


Fig.11 Resistance versus number of measurement for Al/Al obtained by four-wire connection method

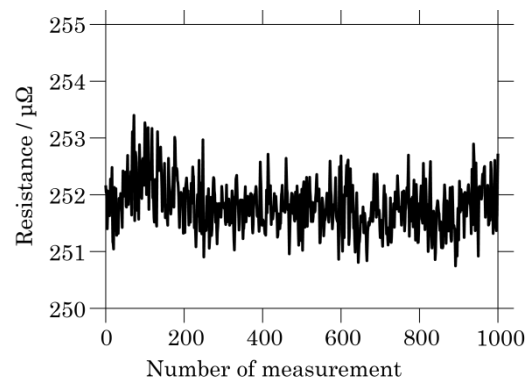


Fig.12 Resistance versus number of measurement for Cu/Cu obtained by four-wire connection method

Table.2 Measurement value of resistance

sample name		$R/\mu\Omega$	sample name		$R/\mu\Omega$
		$\sigma/\mu\Omega$			$\sigma/\mu\Omega$
Al/Al	1	305	Cu/Cu	1	252
		0.65			0.40
	2	256		2	278
		0.42			0.13
	3	267		3	268
		0.24			0.48
Al		295	Cu		267
		0.42			0.37

接合抵抗を含む Al/Al 試験片、Cu/Cu 試験片の方が Al 板および Cu 板の ρ よりも大きくなるはずだが、それぞれ 1 本の試験片で小さくなった。この程度を Table.3 の抵抗率から計算すると、共に 0.6%以下であった。これは、圧接部の変形形状を考慮せずに試験片寸法を決定していることと、寸法測定に含まれる不確かさが原因だと考えられる。しかし、3 本の試験片の抵抗から接合抵抗を求めて平均すれば、概算の接合抵抗として評価できると判断した。

4. 2. 2. 接合抵抗の算出

試験片の接合抵抗は試験片と板の抵抗を比較して求められる。抵抗は試験片や板の寸法によって異なるので、基準寸法の抵抗に変換して比較した。基準寸法は、 $L_s=50\text{mm}$ 、 $d_s=5\text{mm}$ 、 w_s は Al/Al 試験片では 1mm、Cu/Cu 試験片では 0.6mm とした。Table.3 の抵抗率 ρ を用いて、式(2)より求めた基準寸法の抵抗 R_s を Table.4 に示す。Al/Al 試験片の R_s 平均値は $288\mu\Omega$ 、Cu/Cu 試験片の R_s 平均値は $286\mu\Omega$ となった。接合抵抗はこれらの値から同一母材の板の抵抗値を引いて求められる。基準寸法の Al/Al 試験片の接合抵抗は約 $3\mu\Omega$ 、Cu/Cu 試験片の接合抵抗は約 $5\mu\Omega$ になる。 R_s 求めるために用いた抵抗値は 1000 回測定を行ったものの平均値であり、 σ は全ての試験片で R の 1/500 倍程度とばらつきが少ない。このため、上記接合抵抗の見積もりは十分信頼できる。通常、電磁圧接板は 2 本の線状にシーム接合される。この場合、Al/Al 試験片の接合抵抗は $1.5\mu\Omega$ 、Cu/Cu 試験片の接合抵抗は約 $2.5\mu\Omega$ になると考えられる。

5. おわりに

電磁圧接されたそれぞれ 3 本の Al/Al 試験片および Cu/Cu 試験片について、クロスワイヤー法および 4 端子法による電圧測定を行い、試験片の接合抵抗を検討した。

クロスワイヤー法による電圧測定では、電圧が負の値を示したことにより、接合抵抗の測定ができないことが明らかになった。この理由を検証するため、電位分布測定により試験片内部の電位分布を調べ、接合部周辺の抵抗等価回路モデルを検討した。これらの結果から、接合部の厚さ方

向の電圧降下（接合抵抗によるもの）が非常に小さく、主に接合部の長さ方向の電圧降下の影響で負の電圧を示すことを明らかにした。クロスワイヤー法では接合抵抗を測定できないことから 4 端子法にて測定することにした。

Table.3 Resistivity of samples

sample name		$\rho / 10^{-8}\Omega\text{m}$	sample name		$\rho / 10^{-8}\Omega\text{m}$
Al/Al	1	2.91	Cu/Cu	1	1.68
	2	2.84		2	1.76
	3	2.89		3	1.70
Al		2.85	Cu		1.69

Table.4 Standardized value of resistance

sample name		$R_s / \mu\Omega$	sample name		$R_s / \mu\Omega$
Al/Al	1	291	Cu/Cu	1	280
	2	284		2	293
	3	289		3	284
Al		285	Cu		281

4 端子法では、接合抵抗を含む試験片抵抗と圧接されていない Al 板と Cu 板の電圧をそれぞれ測定し、抵抗値を求めた。試験片と板の寸法からそれぞれの抵抗率を算出し、試験片の平均抵抗率は板の抵抗率より大きいことを示した。これらを基準寸法の抵抗に換算して比較し、接合抵抗の概算値を求めた。1 本の線状に接合された試験片幅 5mm の接合抵抗は Al/Al 試験片では約 $3\mu\Omega$ 、Cu/Cu 試験片では約 $5\mu\Omega$ であった。この結果、同種金属を電磁圧接した試験片の接合抵抗が非常に小さいことを明らかにした。

参考文献

- [1] 相沢友勝, 岡川啓悟: 金属薄板の電磁圧接, 塑性と加工, 52-603, pp.424-428, 2011
- [2] 岡川啓悟, 相沢友勝: 電磁シーム溶接における間隙の効果と特徴, 塑性と加工, 48-555, pp.323-327, 2007
- [3] R. Holm: Electric Contacts: Theory and Application, Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp.42-43, 2010
- [4] Keithley Instruments, Inc.: Achieving Accurate and Reliable Resistance Measurements in Low Power and Low Voltage Applications, WHITE PAPER, Keithley Instruments, Inc., USA, No.2455, 2004
- [5] 阿部武雄, 村山実: 電気・電子計測, 森北出版株式会社, pp.59-61, 2007